

2. Полученные в опытах значения коэффициента температуропроводности будут использованы для отработки тепловых режимов гаража-размораживателя ОАО «СУМЗ».

### Список использованных источников

1. Осиновских Л. Л. и др. Температуро- и теплопроводность доменных шлаков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1977. – № 5. – С. 36–40.
2. Рафалович И. М. и др. Определение теплофизических свойств металлургических материалов. М.: Металлургия, 1971. – 160 с.
3. Панов Д. Ю. Справочник по численному решению дифференциальных уравнений в частных производных. М.: Гостехиздат, 1949. 183 с.
4. Сучков В. Д. Исследование теплофизических свойств материалов металлургического производства: кандидатская диссертация. Свердловск: УПИ им. С. М. Кирова, 1971. 145 с.
5. Ваничев А. П. Приближенный метод решения задач теплопроводности при переменных константах // Известия АН СССР. ОТН. 1946. № 12. С. 1767–1774.
6. Лукьянов В. С. Гидравлические приборы для технических расчетов // Известия АН СССР. ОТН. 1939. № 2. С. 5–9.
7. Зиновьев В. Е. Температуропроводность и теплопроводность некоторых переходных металлов при высоких температурах: кандидатская диссертация. Свердловск: УПИ им. С. М. Кирова, 1969. 156 с.
8. Кондратьев Г. М. Регулярный тепловой режим. Л.: Гостехиздат, 1954. 211 с.
9. Кудрявцев Е. Б., Чекалев К. Н., Шумаков Н. В. Нестационарный теплообмен. М.: Наука, 1961. 158 с.
10. Шашков А. Г., Волохов Г. М., Абраменко Т. Н. и др. Методы определения теплопроводности и температуропроводности. М.: Энергия, 1973. 336 с.
11. Ярошенко Ю. Г., Хомутий В. С., Юрьев Б. П., Швыдкий В. С. Особенности измерения температуропроводности методом регулярного режима с учетом ее зависимости от температуры // Известия АН СССР. Металлы. 1977. № 1. С. 70–73.

УДК 669.045

**С. И. Кондрашенко, В. Р. Тихонова**

ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

## РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОГО СТРУЙНОГО РЕКУПЕРАТОРА

### Аннотация

*В данной работе с помощью программно-вычислительного комплекса FloEFD производилось моделирование двух вариантов подогрева воздуха от греющей поверхности рекуператора. В первом случае воздух движется вдоль греющей поверхности рекуператора, а во втором струи воздуха «атакуют» греющую поверхность. Приведены значения коэффициентов теплоотдачи и плотности тепловых потоков на греющей поверхности рассматрива-*

емого рекуператора для обоих случаев. Показаны способы подачи воздуха в каждом из вариантов. Сделаны выводы о возможности применения данных способов нагрева воздуха, удовлетворяющих комплексу технологических и энерго-экологических требований.

*Ключевые слова:* струйный нагрев, коэффициент теплоотдачи, рекуператор, нагрев воздуха, моделирование.

### **Abstract**

*In this paper by means of software and computing complex FloEFD the modeling of two variants of air heating from the cylindrical recuperator surface were presented. In the first scheme the air moves along the heating surface; in the second represented heating scheme a jet of air "attacks" the heating surface. The values of the heat transfer coefficients and heat flux density on the heating surface for both schemes were shown. Methods of air input for each scheme are presented. Conclusions about the possibility of applying these schemes of air heating, satisfying a set of technological and energy- environmental requirements were made.*

*Keywords:* jet heating, heat transfer coefficient, recuperator, air heating, simulation.

В настоящее время в условиях повышения цен на топливно-энергетические ресурсы все больше внимания уделяется вопросам совершенствования технологических процессов, эффективности использования энергоресурсов, в частности, топливных ресурсов. Сбережение энергии, повышение энергоэффективности – верный путь к экономическому росту в будущем.

С точки зрения совершенствования технологических процессов значительное внимание уделяется разработке и внедрению различных способов нагрева металла и воздуха, поступающего на горение, с использованием струйного скоростного нагрева (скоростной, радиационно-струйный, нагрев при сжигании топлива на поверхности) [1].

При струйном конвективном нагреве основное количество теплоты к металлу передается конвекцией и основной количественной характеристикой интенсивности этого процесса является величина коэффициента теплоотдачи.

Использование тепла, отводимого из рабочего пространства промышленных печей, имеет важное экономическое значение. Одним из способов использования этого тепла является рекуперация теплоты отходящих продуктов сгорания – нагрев воздуха или газа для повышения эффективности использования топлива (т. е. снижение его расхода). Возможность разработки рекуператора на основе струйного конвективного нагрева смогла бы уменьшить расход топлива, вредные выбросы и, что самое главное, время технологического процесса.

Методом математического моделирования проведен расчет двух вариантов нагрева воздуха, поступающего на горение, отходящими продуктами сгорания. Продукты сгорания и воздуха движутся в противоток друг другу, но в первом нагреваемый воздух движется вдоль теплопередающей поверхности, а во втором струи воздуха дополнительно «атакуют» теплопередающую поверхность. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

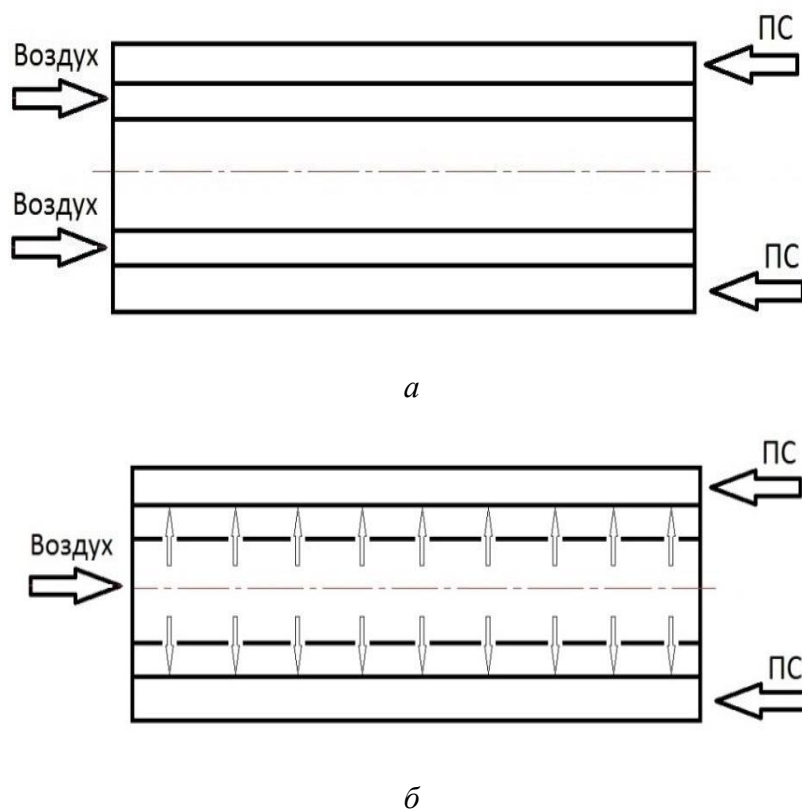


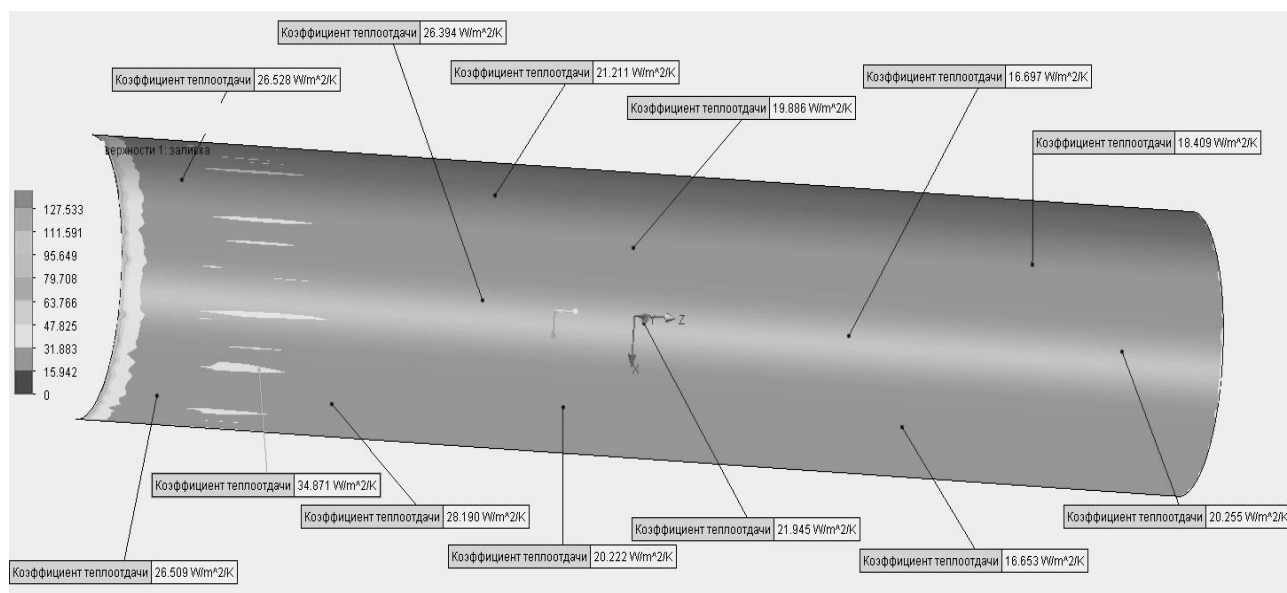
Рис. 1. Схема теплообмена в рекуператоре при противотоке в системе с перфорированной поверхностью: *а* – эксперимент № 1; *б* – эксперимент № 2

Для получения результатов в вычислительном комплексе FloEFD были заданы граничные условия на входе и на выходе для продуктов сгорания, и воздуха, а также материал теплопередающей трубы. Решались уравнения: неразрывности, три уравнения Навье-Стокса, три уравнения модели турбулентности ( $\kappa$ - $\epsilon$ ), уравнение энергии [2]. Ниже, на рис. 2, 3, представлены поля коэффициентов теплоотдачи и плотности теплового потока от поверхности трубы к нагреваемому воздуху.

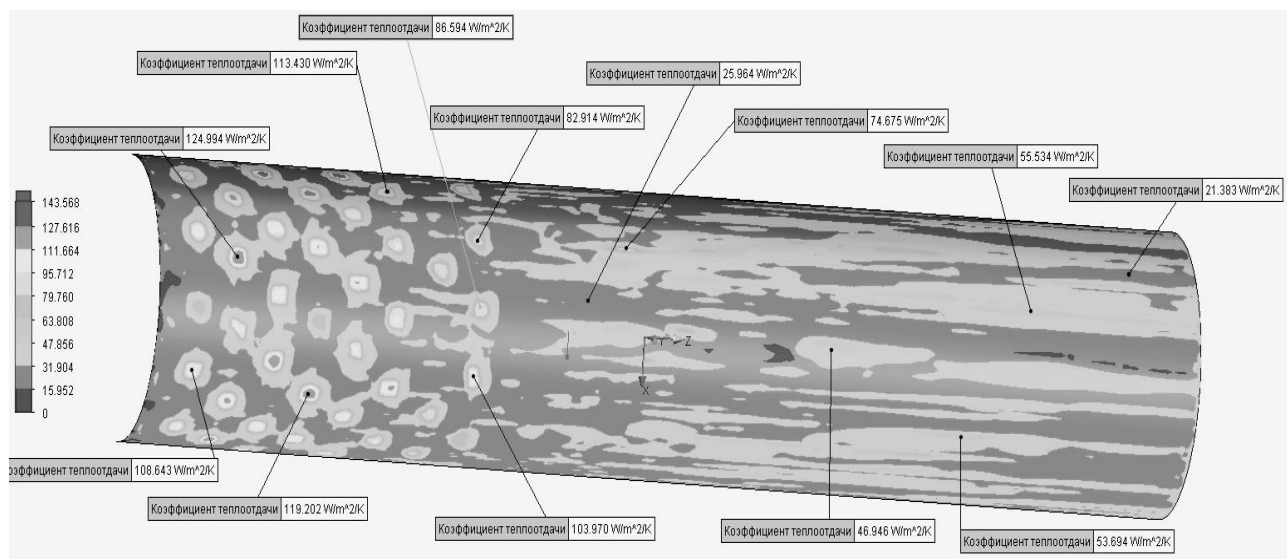
На рис. 2, *а* видно, что значения коэффициентов теплоотдачи имеют достаточно однородное распределение, но невысокие значения от 15 до 25 Вт/м<sup>2</sup>·К, и только в небольшой области относительно всей площади от входного отверстия воздушного потока наблюдается больший коэффициент теплоотдачи (~50 Вт/м<sup>2</sup>·К), что связано с большой разницей температур между воздухом и греющей поверхностью в этой области. На рис. 2, *б* значения коэффициентов теплоотдачи имеют достаточно выраженные локальные максимумы (от 100 до 120 Вт/м<sup>2</sup>·К) в месте взаимодействия струй с греющей поверхностью за счет высокой скорости истечения струй воздуха, подаваемых по нормали этой поверхности, что приводит к уменьшению пограничного слоя. Помимо локальных максимумов наблюдается увеличение среднего по поверхности коэффициента теплоотдачи (~50 Вт/м<sup>2</sup>·К) за счет завихрений, создаваемых струями, что приводит к многократному взаимодействию струй воздуха с греющей поверхностью.

Аналогичные результаты можно наблюдать на схемах с полями плотностей тепловых потоков. На рис. 3, *а* видно, что значения плотностей тепловых потоков имеют достаточно однородное распределение от 12 до 15 кВт/м<sup>2</sup>, и только на небольшом расстоянии от входного отверстия воздушного потока наблюдается большая плотность теплового потока (~30

кВт/м<sup>2</sup>). На рис. 3, б значения плотностей тепловых потоков имеют достаточно выраженные локальные максимумы от 45 до 65 кВт/м<sup>2</sup> в месте взаимодействия струй с греющей поверхностью. Помимо локальных максимумов наблюдается увеличение средней по поверхности плотности теплового потока (~ 30 кВт/м<sup>2</sup>) за счет завихрений, создаваемых струями. Однородная картина распределения плотностей тепловых потоков и коэффициентов теплоотдачи объясняется линейной связью между ними.

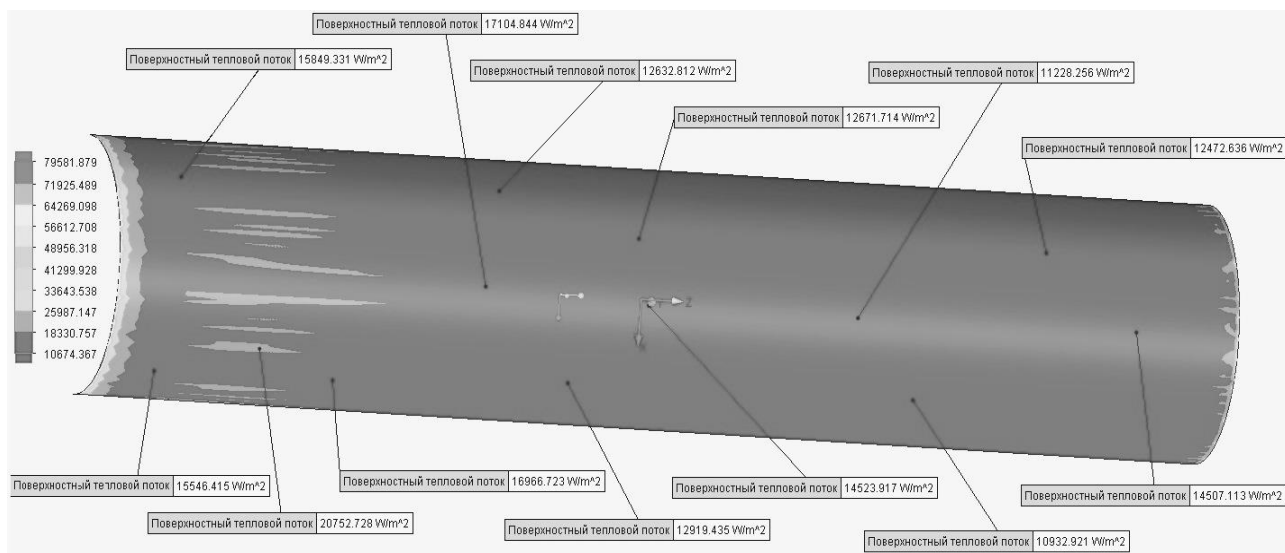


*a*

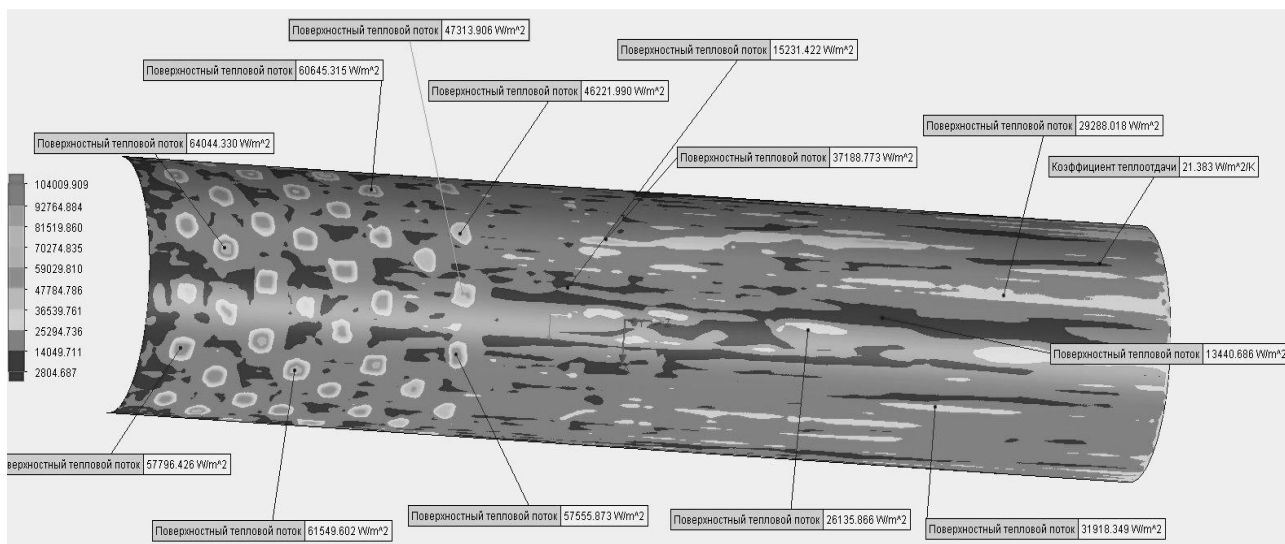


*б*

Рис. 2. Поле коэффициентов теплоотдачи от поверхности трубы к воздуху:  
*a* – в первом эксперименте; *б* – во втором эксперименте



*a*



*б*

Рис. 3. Поле плотности тепловых потоков от поверхности трубы к воздуху:  
*a* – в первом эксперименте; *б* – во втором эксперименте

По полученным результатам можно сделать вывод о том, что применение струйного конвективного нагрева увеличивает коэффициент теплоотдачи, а следовательно, и плотность теплового потока в 2–4 раза, за счет высокой скорости истечения струй воздуха, подаваемых нормально к греющей поверхности. А также, подтверждает возможность разработки рекуператора на основе струйного конвективного нагрева.

### Список использованных источников

1. Прибытков И. А. Энергосберегающие способы нагрева металла на основе использования струй. М.: МИСиС, 2006. С. 375–390.
2. Арутюнов В. А., Бухмиров В. В., Крупенников С. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. М.: Металлургия, 1990. 240 с.